

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА НА МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ МЮОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ

*И. Ю. Трошин* \*, *Е. А. Задеба*, *В. С. Воробьев*,  
*Р. В. Николаенко*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

В НИЯУ МИФИ создается детектор на многопроволочных дрейфовых камерах для исследования околоразличной мюонной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ). Для анализа ШАЛ по мюонам необходимо отделять их от вторичных частиц как самого ливня, так и рожденных внутри детектора. В связи с этим детектор состоит из нескольких слоев дрейфовых камер и стального поглотителя. Данная работа посвящена анализу данных моделирования прохождения мюонов и электронов через детектор в широком диапазоне энергий. Результаты моделирования демонстрируют, что использование предложенной конфигурации детектора позволяет эффективно выделять мюонную компоненту ШАЛ.

A detector based on multi-wire drift chambers is being created at MEPHI to study the near-vertical muon component of extensive air showers (EAS). To analyze EAS by muons, it is necessary to separate them from secondary particles both in air showers and those born inside the detector. For this purpose, the detector consists of several layers of drift chambers and a steel absorber. This work is devoted to the analysis of modeling the passage of muons and electrons through the detector in a wide range of energies. The simulation results demonstrate that the use of the proposed detector configuration makes it possible to efficiently isolate the muon component of EAS.

PACS: 95.55.Vj; 95.85.Ry; 29.40.Cs

### **ВВЕДЕНИЕ**

В НИЯУ МИФИ разрабатывается многоцелевой детектор мюонов (МДМ) для изучения мюонной компоненты ШАЛ. Детектор представляет собой массив многопроволочных дрейфовых камер, экранированных слоями поглотителя. В каждом слое два уровня дрейфовых камер ориентированы перпендикулярно друг к другу для получения двух проекций события. Изображение детектора представлено на рис. 1. Детектор

---

\* E-mail: IYTroshin@mephi.ru

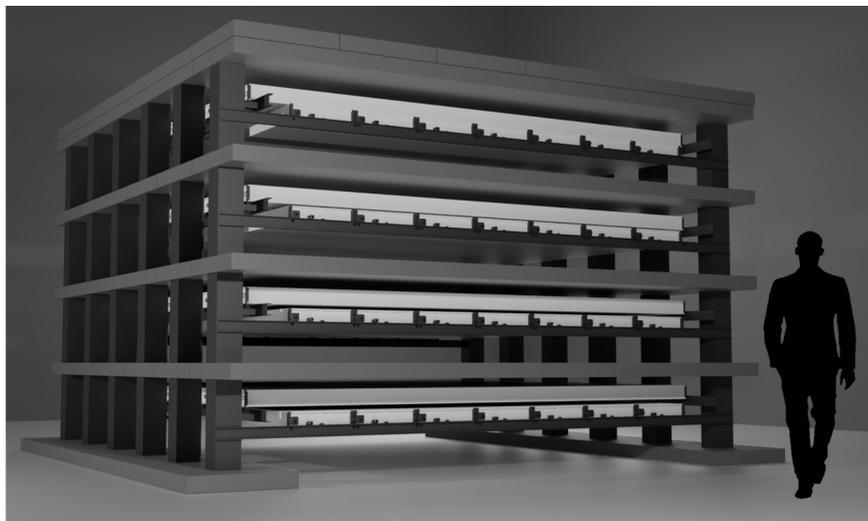


Рис. 1. Визуализация детектора МДМ: дрейфовые камеры (белый цвет), стальной поглотитель (серый) и рамная конструкция (черный)

предназначен для регистрации частиц в диапазоне зенитных углов от 0 до  $60^\circ$  и анализа околосвертикальных мюонов ШАЛ с использованием метода спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ) [1]. При совместной работе МДМ с другими детекторами комплекса НЕВОД [2–5] будут построены функции пространственного распределения (ФПР) мюонов в ШАЛ.

Многопроволочные дрейфовые камеры, предназначенные для МДМ, ранее успешно применялись в других экспериментах [6, 7] и продемонстрировали высокую эффективность регистрации мюонов космических лучей.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА С ПОГЛОТИТЕЛЕМ

Для определения пороговых энергий мюонов и электронов проводилось моделирование детектора с поглотителем в программном пакете Geant4 [8]. Частицы при моделировании начинали движение в верхней точке над детектором и двигались в его сторону, взаимодействуя с материалом детектора и дрейфовыми камерами. Модель МДМ (рис. 2) состоит из четырех слоев дрейфовых камер размером  $3700 \times 3700 \times 250$  мм и четырех слоев стального поглотителя, верхний слой поглотителя имеет размер  $4500 \times 4500 \times 210$  мм, остальные три слоя по  $4500 \times 4500 \times 105$  мм каждый. Атомарный состав стального поглотителя включает 98,81 % железа, 0,17 % углерода, 0,65 % марганца, 0,30 % кремния, 0,04 % фосфора и 0,03 % серы.

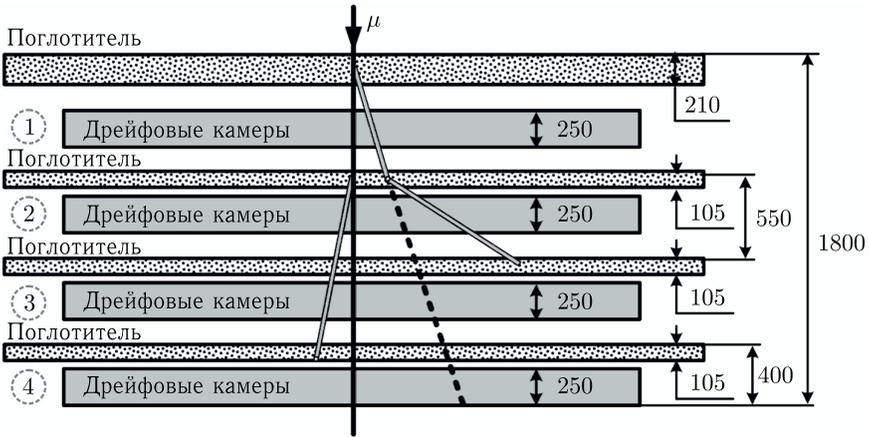


Рис. 2. Модель детектора МДМ в Geant4 с характерными размерами и пример реконструкции события: черный трек — мюон, серые треки — вторичные частицы, штриховая линия — прямая экстраполяция трека

По данным моделирования изучалась способность детектора различать мюоны от электронов в ШАЛ, а также возможность отделять треки высокоэнергичных мюонов от вторичных частиц, генерируемых в веществе поглотителя. Наиболее толстый верхний слой поглотителя служит для ослабления потока частиц сопровождения, в то время как нижние слои обеспечивают фильтрацию частиц, рожденных в детекторе.

Моделирование процесса прохождения и регистрации частиц через детектор проведено при энергиях в диапазоне от 100 МэВ до 100 ТэВ с постоянным логарифмическим шагом  $E_{i+1}/E_i = 1,2$ . Для каждого значения энергии было промоделировано по тысяче одиночных событий. Анализировались заряженные частицы (включая вторичные), прошедшие через весь чувствительный объем дрейфовых камер.

На рис. 3 представлено количество частиц, зарегистрированных во второй плоскости дрейфовых камер, относительно их начального числа в зависимости от энергии начальной частицы, запущенной над детектором. При моделировании прохождения мюонов через поглотитель генерировались вторичные частицы: при низких энергиях доминировали дельта-электроны, при высоких — электрон-позитронные пары, также при высоких энергиях генерировались пионы и ядра азота и кислорода. До 1 ТэВ число вторичных частиц от мюона не превышает их изначальное количество, выше 1 ТэВ число вторичных частиц больше их изначального количества и растет экспоненциально с ростом энергии первичной частицы. При моделировании электронов во всем исследуемом энергетическом диапазоне доминирует эффект рождения электрон-позитронных пар, поэтому рост вторичных частиц экспоненциальный и содержит в основном электроны и позитроны. Из распределений (см. рис. 3) определялись пороговые энергии регистрации:  $E_{\min}$  — минимальная

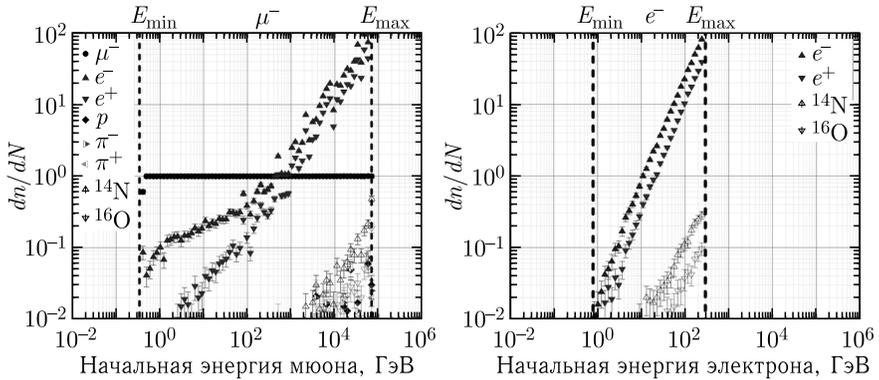


Рис. 3. Число заряженных частиц ( $dn/dN$ ), прошедших через второй слой дрейфовых камер, по отношению к начальному числу частиц в зависимости от энергии начальной частицы: мюона (слева) и электрона (справа)

энергия первичной частицы, при которой она проходит через поглотители и регистрируется дрейфовыми камерами, и  $E_{\max}$  — максимальная энергия, при которой число вторичных частиц не превышает 200 на плоскость, что обусловлено предельной возможностью реконструкции в дрейфовых камерах.

При анализе данных моделирования, полученных с двух верхних и всех четырех слоев дрейфовых камер, были определены граничные значения энергии  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$ , которые представлены в таблице. Результаты показывают, что выбранная конфигурация детектора позволяет эффективно выделять мюонные события в широком диапазоне энергий.

**Пороговые энергии для мюона и электрона**

Частица	$E_{\min}$ (два слоя), ГэВ	$E_{\max}$ (два слоя), ГэВ	$E_{\max}$ (четыре слоя), ГэВ
Мюон	$0,34 \pm 0,03$	$0,59 \pm 0,06$	$(6,9 \pm 0,5) \cdot 10^4$
Электрон	$0,79 \pm 0,02$	$1,1 \pm 0,1$	$(2,9 \pm 0,3) \cdot 10^2$

## МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Конфигурация детектора, состоящего из нескольких слоев дрейфовых камер, разделенных слоями поглотителя, позволяет отфильтровать треки вторичных частиц, родившихся в детекторе, при использовании метода реконструкции, который выделяет прямолинейный трек мюона по отклику в дрейфовых камерах одновременно во всех слоях. Вторичные частицы, рожденные в детекторе, либо поглощаются, либо отклоняются от своего первоначального направления в промежуточных слоях поглотителя. Критерии выделения мюонов среди всех заряженных частиц: разница по зенитному углу не более  $5^\circ$ , отклонение по координате не более

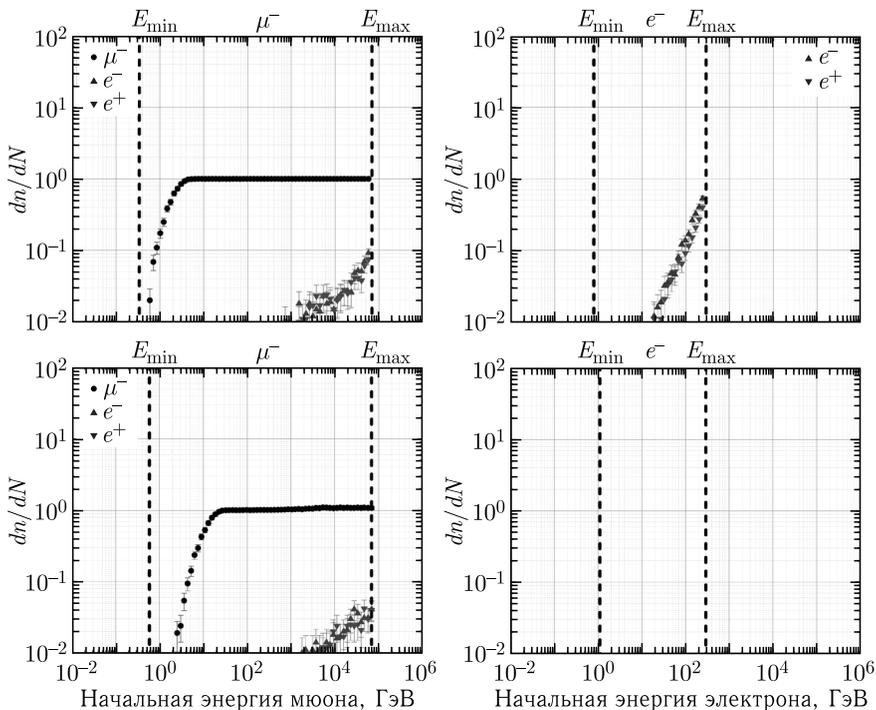


Рис. 4. Число частиц, реконструированных как мюон ( $dn/dN$ ), по отношению к начальному числу частиц в зависимости от энергии начальной частицы: мюона (слева) и электрона (справа) по двум (вверху) и четырем (внизу) слоям дрейфовых камер

5 мм, расстояние между треками больше 3 мм, а также ограничение на количество частиц — не более 200 на плоскость.

Из данных, полученных при применении двух слоев дрейфовых камер (рис. 4, вверху), большая часть вторичных частиц отфильтровывается. В диапазоне энергий от 3 ГэВ до 1 ТэВ одиночные мюоны идентифицируются с примесью вторичных частиц не более 1%. Метод реконструкции хуже работает при энергиях выше 1 ТэВ, так как рождается много вторичных частиц внутри стального поглотителя. При использовании четырех слоев дрейфовых камер и четырех слоев поглотителя (см. рис. 4, внизу) энергетический диапазон расширяется до 10 ТэВ, однако при низких энергиях мюоны могут ошибочно отсекаются из-за рассеяния. При использовании такого метода реконструкции на четырех слоях электроны отсеиваются полностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для нового детектора на многопроволочных дрейфовых камерах проведено моделирование, которое показало, что предложенная конфигура-

ция позволяет успешно выделить мюоны высокой энергии в диапазоне от 3 ГэВ до 10 ТэВ и эффективно отсеивать вторичные частицы, рожденные внутри детектора.

Детектор открывает возможность изучать спектр первичных космических лучей при помощи метода СЛПМ и строить ФПР мюонов ШАЛ при совместной работе с другими детекторами.

Работа выполнена на уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» и поддержана Российским научным фондом (№ 23-72-10067, <https://rscf.ru/project/23-72-10067>).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов А. Г., Громушкин Д. М., Кокоулин Р. П., Маннокки Д., Петрухин А. А., Сааведра О., Тринкери Д., Чернов Д. В., Шутенко В. В., Яшин И. И. Исследование характеристик потока и взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов // ЯФ. 2010. Т. 73, № 11. С. 1904–1920.
2. Yashin I., Amelchakov M., Astapov I., Barbashina N., Bogdanov A., Bogdanov F., Borog V., Chiavassa A., Dmitrieva A., Gromushkin D. et al. NEVOD — an Experimental Complex for Multi-Component Investigations of Cosmic Rays and Their Interactions in the Energy Range 1–10<sup>10</sup> GeV // J. Instrum. 2021. V. 16, No. 08. P. T08014.
3. Николаенко Р. В., Богданов А. Г., Воробьев В. С., Задеба Е. А., Трошин И. Ю., Хомчук Е. П. Моделирование отклика детектора ТРЕК при регистрации групп мюонов от первичных космических лучей сверхвысоких энергий // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85, № 4. С. 576–578.
4. Шульженко И. А., Амельчаков М. Б., Барбашина Н. С., Богданов А. Г., Киндин В. В., Кокоулин Р. П., Компаниец К. Г., Кьявасса А., Ликий О. И., Маннокки Д. и др. Проект установки НЕВОД-ШАЛ для регистрации широких атмосферных ливней // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77, № 5. С. 710–712.
5. Богданов Ф. А., Громушкин Д. М., Ижбулякова З. Т., Почестнев А. Д., Шульженко И. А., Юрин К. О. Исследование характеристик нейтронной компоненты широкого атмосферного ливня по данным установки УРАН // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85, № 4. С. 560–562.
6. Vorobev V. S., Zadeba E. A., Nikolaenko R. V., Troshin I. Yu. Multiparticle Events in Cosmic Rays, Recorded by Drift Chambers // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87, No. 7. P. 918–921.
7. Vorobev V. S., Zadeba E. A., Nikolaenko R. V., Petrukhin A. A., Troshin I. Yu. Application of Deep Learning Techniques for Multiparticle Track Reconstruction of Drift Chamber Data // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 9. P. 1567–1571.
8. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G. et al. Geant4 — a Simulation Toolkit // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506, No. 3. P. 250–303.